

УДК 622.062:622.281

## ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА НАДЕЖНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ КОМПЛЕКСЕ ШАХТ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

*Б.Н. Андреев, Д.В. Бровко, В.В. Хворост, К.А. Агатьев, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Украина*

Выполнен анализ общих требований к динамическому расчету зданий и сооружений поверхности шахт.

**Проблема и ее связь с практическими задачами.** Существующая нормативная база по управлению безопасностью строительных объектов не в полной мере справляется с возложенными на нее задачами, а норм, которые регламентируют риск аварии зданий, нет вообще. Использование в строительстве методики нормирования, основанной на коэффициентах надежности, теоретически обеспечивает безопасность строительных конструкций. Однако, опыт эксплуатации конструкций показывает, что надежность является необходимым, но не достаточным условием безопасности.

Установлено, что в 80% случаев причиной строительных аварий являются грубые человеческие ошибки, допускаемые при проектировании, изготовлении и монтаже несущих конструкций, которые при невыгодном сочетании с непредсказуемыми факторами природно-климатического и техногенного характера становятся причинами обрушений строящихся и уже построенных зданий и сооружений.

Современный уровень развития техники характеризуется широкой механизацией и автоматизацией производственных процессов, оснащением промышленных предприятий новейшими станками и машинами, а также точной измерительной аппаратурой для контроля технологических операций. Все это повышает значение динамического расчета как основы мероприятий по борьбе с колебаниями проектируемых строительных конструкций.

Уменьшение колебаний конструкций при работе машин часто необходимо не только для обеспечения долговечности самих конструкций, но и для ликвидации вредного воздействия колебаний на людей, обслуживающих производство, а также на технологические операции, нередко отличающиеся высокой точностью. Современный динамический расчет несущих конструкций зданий преследует именно эти цели. Его первоочередной задачей является оценка интенсивности ожидаемых колебаний еще до возведения сооружения и проверка допустимости этих колебаний с точки зрения их влияния на людей, производственные процессы и строительные конструкции. Можно считать, что задачи динамического расчета выполнены, если ожидаемые колебания оказываются допустимыми со всех указанных точек зрения. В противном случае необходимо уменьшить колебания способом, наиболее целесообразным и экономичным при данных конкретных условиях.

Эта последняя задача решается на основе анализа результатов динамического расчета, позволяющих выявить причины колебаний повышенной интенсивности. Эффективность мероприятий по уменьшению колебаний должна быть проверена динамическим расчетом и в последующем использована для оценки риска надежности строительного объекта в целом.

**Постановка задачи.** Основные цели динамического расчета конструкции заключаются в обеспечении, во-первых, ее несущей способности и, во-вторых, допустимых величин амплитуд ее колебаний.

В соответствии с этими целями в задачу динамического расчета конструкции входит определение внутренних динамических усилий в ее элементах и перемещений, обусловленных динамическими деформациями ее элементов. С точки зрения этой основной задачи, определение частот собственных колебаний конструкции выступает как задача, ей подчиненная, однако чрезвычайно важная: не зная частот собственных колебаний, невозможно бо-

лее или менее надежно оценить величины амплитуд внутренних усилий и перемещений. Помимо этого, знание частот собственных колебаний конструкции имеет и самостоятельное значение, позволяя уяснить причины возникновения сравнительно больших колебаний и в соответствии с этим указать эффективные мероприятия, ведущие к их уменьшению [2].

Если в результате динамического расчета конструкции выясняется, что несущая способность ее обеспечена, а расчетные значения амплитуд колебаний конструкции не превышают допустимых, то цели динамического расчета достигнуты. Если же в результате динамического расчета обнаруживается, что несущая способность конструкции превзойдена вследствие появления в ней динамических усилий или что расчетные значения амплитуд динамических перемещений превышают допустимые значения, тогда возникает задача выбрать эффективный и экономичный способ уменьшения колебаний конструкции.

Из сказанного следует, что динамический расчет строительных конструкций не только не противопоставляется проектированию мероприятий по уменьшению колебаний, но сам призван служить этой же цели. Необходимость и целесообразность осуществления тех или иных способов уменьшения колебаний может быть установлена в результате динамического расчета конструкции, а эффективность этих мероприятий может быть проверена повторным динамическим расчетом конструкции. Однако чаще всего к мероприятиям по уменьшению колебаний обращаются обычно лишь тогда, когда их настоятельная необходимость обнаруживалась в процессе продолжительной эксплуатации сооружения и возникновения дефектов в конструктивных элементах.

**Изложение материала и результатов.** Состояние конструкции, при достижении которого дальнейшая ее эксплуатация не представляется возможной по тем или иным соображениям, принято называть предельным. В настоящее время различают три основных предельных состояния строительных конструкций.

Первое предельное состояние характеризуется достижением конструкцией предела ее несущей способности, т. е. либо предела прочности или текучести, либо предела выносливости, либо предела устойчивости, в результате чего конструкция теряет способность сопротивляться внешним (статическим и динамическим) воздействиям или получает такие большие остаточные изменения формы, при которых ее дальнейшая эксплуатация невозможна.

Второе предельное состояние характеризуется такими величинами упругих деформаций или перемещений от статических и динамических нагрузок, при которых конструкция, не достигшая первого предельного состояния, все же перестает отвечать своему назначению, и ее эксплуатация должна быть прекращена или прервана впредь до исправления конструкции.

Третье предельное состояние характеризуется появлением в конструкции трещин такого раскрытия или развития, при котором дальнейшая эксплуатация конструкции, еще не достигшей первого предельного состояния, становится невозможной вследствие потери требуемых от нее специальных свойств.

В эти общие характеристики предельных состояний укладываются, как мы видим, и характеристики предельных состояний конструкций, подверженных воздействию, кроме статических, также динамических нагрузок, или, иначе говоря, колеблющихся конструкций. Однако первое и второе предельные состояния колеблющихся конструкций требуют более конкретного определения. Поскольку предел выносливости меньше предела статической прочности и нередко может быть меньше предела текучести, а потеря динамической устойчивости может наступить раньше потери статической устойчивости, динамическая несущая способность (выносливость и динамическая устойчивость) может нередко иметь решающее значение при определении характера первого предельного состояния колеблющихся конструкций.

Однако вопрос о том, который из пределов - статической или динамической прочности - является доминирующим при определении несущей способности конструкции, решается в зависимости от соотношения между величинами статической и динамической нагрузок, действующих на конструкцию, а также от соотношения между пределами статической и динамической прочности материала конструкции.

Конструкции, в которых обеспечена несущая способность на статические нагрузки, обладают обычно и достаточной статической жесткостью. Случаи, когда статические деформации конструкции, не представляющие опасности в отношении ее прочности, являются причиной нарушения нормальных условий производства или его прекращения, являются сравнительно редкими.

Иначе обстоит дело со вторым предельным состоянием для колеблющихся конструкций, которое должно быть определено как такое состояние, когда амплитуды колебаний (перемещений) конструкции достигают величин, при которых исключается возможность дальнейшей эксплуатации или для производственного процесса создаются ненормальные условия.

Известны два вида второго предельного состояния колеблющихся конструкций:

- а) предельное состояние, при котором колебания конструкции оказывают вредное влияние на людей;
- б) предельное состояние, при котором колебания конструкции оказывают вредное влияние на производственный процесс.

Второе предельное состояние может часто ограничивать возможность эксплуатации колеблющейся конструкции, на которой работают люди или расположены чувствительные к колебаниям установки, хотя в конструкции еще далеко не достигнуто первое предельное состояние.

Требования, направленные к обеспечению несущей способности конструкций, находящихся под воздействием только статических нагрузок, выражаются, как известно, неравенствами вида [2]:

$$\left. \begin{aligned} M_{cm} &\leq M; \\ Q_{cm} &\leq Q; \\ N_{cm} &\leq N. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь  $M_{cm}, Q_{cm}, N_{cm}$  – соответственно расчетные изгибающий момент, поперечная и нормальная сила в рассматриваемом сечении элемента конструкции от расчетной статической нагрузки (т. е. с учетом коэффициентов перегрузки);

$M, Q, N$  – предельные значения соответствующих усилий, определяемые по расчетному сопротивлению материала (т. е. с учетом коэффициента однородности) и с учетом коэффициентов условий работы конструкции. При этом для бетона и каменной кладки за расчетные сопротивления принимается расчетный предел прочности, а для сталей и дерева – расчетный предел текучести.

Запас прочности обеспечивается коэффициентами перегрузки, большими единицы (в левой части), и коэффициентами однородности материала и условий работы конструкции, меньшими единицы (в правой части).

Если же конструкция будет находиться под воздействием динамических нагрузок, в ее элементах будут действовать одновременно как постоянные (статические), так и переменные (динамические) внутренние усилия. Расчетные значения динамических усилий можно написать в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} M_{дин} &= M_0 f_1(t); \\ Q_{дин} &= Q_0 f_2(t); \\ N_{дин} &= N_0 f_3(t). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $M_0, Q_0, N_0$  – амплитуды расчетных динамических усилий;  
 $f_1(t), f_2(t), f_3(t)$  – периодические функции времени  $t$ , максимумы которых равны  $\pm 1$ .

Наибольшее общее усилие будет представляться суммой статического усилия и максимума соответствующего динамического усилия, взятого со знаком статического усилия и равного по абсолютной величине его амплитуде.

Очевидно, что для колеблющихся конструкций, во всяком случае, необходимо выполнение следующих условий:

$$\left. \begin{aligned} M_{ст} + M_0 &\leq M; \\ Q_{ст} + Q_0 &\leq Q; \\ N_{ст} + Q_0 &\leq N. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для пластических материалов (сталь) при по очень больших динамических нагрузках предел текучести оказывается меньше предела выносливости, и условия (3) будут достаточными.

Для хрупких же материалов, а также для пластических материалов при достаточно больших динамических нагрузках несущая способность будет определяться выносливостью материала. В таком случае необходимым является также выполнение условий, чтобы суммарные внутренние усилия в элементах конструкции не превосходили предельных усилий, определенных по расчетному пределу выносливости. Эти условия можно записать так:

$$\left. \begin{aligned} M_{ст} + M_0 &\leq M_{вын}; \\ Q_{ст} + Q_0 &\leq Q_{вын}; \\ N_{ст} + Q_0 &\leq N_{вын}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Условия (3) и (4), рассматриваемые совместно, являются необходимыми и достаточными для обеспечения несущей способности колеблющихся конструкций. При этом само собой разумеется, что при сложных напряженных состояниях, которым отвечают комбинации усилий в левых частях неравенств (3) и (4) (например, комбинации усилий  $M$  и  $N$  — для сжатых-изгибаемых элементов), в правых частях этих неравенств должны также стоять соответствующие этим комбинациям предельные усилия.

Строительные конструкции, например несущие конструкции зданий, должны рассматриваться как системы с бесконечно большим числом степеней свободы. Поэтому конструкция имеет большое количество частот собственных колебаний (теоретически — бесконечное). Совокупность частот собственных колебаний конструкции, расположенных в возрастающей последовательности

$$0 \leq n_1 \leq n_2 \leq n_3 \leq \dots \leq n_n \leq \dots, \quad (5)$$

называют спектром частот собственных колебаний конструкции. Частоту, имеющую на этом спектре порядковый номер  $k$ , называют  $k$ -й частотой или частотой  $i$ -го тона собственных колебаний. Первую частоту иногда называют основной частотой или частотой основного тона.

Для наглядности спектр частот полезно изображать графически числовой осью, на которой положение частот собственных колебаний конструкции отмечены перпендикулярными оси отрезками (рис. 1). При этом первую частоту удобно принимать за единицу, иначе говоря, откладывать на числовой оси отношения  $n_k/n_1$ .

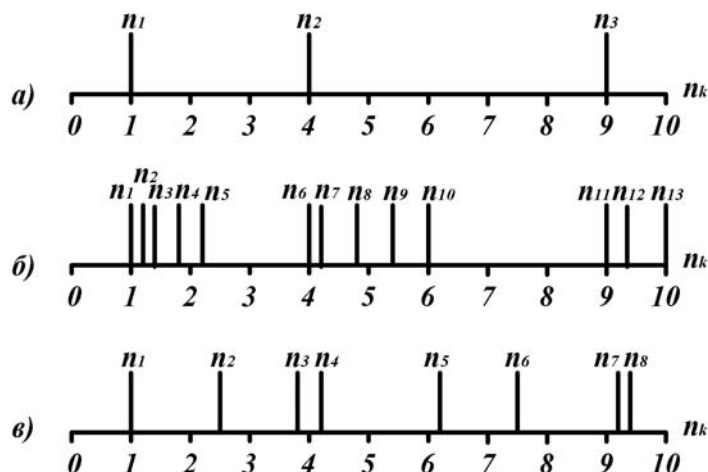


Рис. 1. Спектр частот собственных колебаний конструкции с неподвижными узлами  
а – однопролетных; б – неразрезных равнопролетных; в – неразрезных неравнопролетных.

Спектр частот собственных колебаний (5) является важной динамической характеристикой конструкции. Располагая им, можно ответить на вопрос о том, при каких значениях частоты динамической нагрузки возможны большие колебания конструкции. Как показано выше, это будут значения, совпадающие с частотами собственных колебаний конструкции. Такие значения частот динамической нагрузки называются критическими для данной конструкции. Следовательно, спектр частот собственных колебаний конструкции является вместе с тем спектром критических значений частоты динамической нагрузки.

Практический интерес представляет также взаимное расположение частот собственных колебаний на спектре, или структура частотного спектра конструкции. В зависимости от вида конструкции структура ее частотного спектра может быть различной. С этой точки зрения полезна следующая классификация несущих конструкций зданий:

Важнейшим следствием неучета свойств конструкции при определении динамического воздействия машины по способу динамического коэффициента было игнорирование явления резонанса. Между тем теория колебаний в применении к инженерному делу, в особенности к кораблестроению и машиностроению, рассматривала резонанс как безусловно опасное явление в работе конструкции на динамическую нагрузку. Отражением этого взгляда и явилось требование об исключении возможности резонанса в сооружениях [3]. Согласно этому требованию, частота собственных колебаний конструкции  $n_1$  должна быть ниже или выше частоты динамической нагрузки  $n_0$  не менее чем на 20%:

$$0.8n_1 \leq n_0 \leq 1.2n_1. \quad (6)$$

Запас в 20% назначен из соображений, что расчетное значение частоты собственных колебаний конструкции вследствие неопределенности исходных данных может отличаться от фактического значения на  $\pm 20\%$ . Это требование было первым шагом в направлении учета динамических свойств конструкции при оценке воздействия на нее динамической нагрузки.

Область отношений частот, ограниченная пределами 0,8 и 1,2, называемая резонансной зоной, представляет, таким образом, запрещенную зону ( $\beta = \infty$ ).

Удовлетворить требованию исключения возможности резонанса практически бывает трудно, а часто и невозможно, например, когда речь идет о междуэтажных перекрытиях, на которых рядом располагаются машины с различными числами оборотов. В этом случае при смещении резонансной зоны влево или вправо (путем уменьшения или увеличения частоты собственных колебаний перекрытия) с целью выведения из нее числа оборотов какой-либо одной машины в эту зону может попасть число оборотов другой машины.

Эти затруднения усугубляются вследствие того, что перекрытия обладают не одной частотой собственных колебаний, с которой следует практически считаться, а целым спектром

таких частот, расположенных близко друг к другу. Если  $n_1$  – наименьшая, а  $n_n$  – наибольшая из указанных частот, то требование исключения возможности резонанса наложения на частоту машины  $n_0$  по аналогии с (6) условие

$$0.8n_1 \leq n_0 \leq 1.2n_n. \quad (7)$$

Таким образом, последовательное развитие требования исключения возможности резонанса машины с перекрытием привело к отрицанию возможности во многих случаях его практического осуществления.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Общие основания динамического расчет строительных конструкций сформулировать следующим образом.

1. Динамические нагрузки при определении амплитуд вынужденных колебаний конструкции должны рассматриваться независимо от статических нагрузок.

2. Резонансные условия работы конструкции можно рассматривать как допустимые, если только проверочный расчет конструкции на резонанс показывает, что в этих условиях удовлетворяются требования в отношении несущей способности и амплитуд колебаний конструкции.

3. Степень вероятности появления резонанса между динамической нагрузкой и конструкцией устанавливается путем определения частот собственных колебаний конструкций и сравнения их с частотами динамической нагрузки. При этом должно учитываться важное обстоятельство, что расчетное определение частоты собственных колебаний конструкции не может дать фактического значения частоты, но лишь нижний и верхний пределы некоторого диапазона, в котором оно заключено.

4. Если установлено, что частота динамической нагрузки попадает в резонансную зону, конструкция проверяется на резонанс. При этом для обеспечения надежности определения амплитуд резонансных колебаний конструкции применяется метод их оценки.

В заключение необходимо заметить, что обоснование принципиальной возможности допущения резонанса в строительных конструкциях было бы неправильно истолковывать как отрицание желательности его исключения там, где это возможно. Напротив, во всех случаях, когда имеется возможность исключения резонанса, а ее осуществление не встречает затруднений и оправдывается экономически, следует ею воспользоваться.

#### *Список литературы*

1. Сорокин Е.С. Динамический расчет несущих конструкций зданий / Е.С. Сорокин. М.: Госстройиздат, 1958. - 120 с.
2. Сорокин Е.С. Динамический расчет несущих конструкций зданий / Е.С.Сорокин. – Москва: Госстройиздат, 1956. – 340 с.
3. Справочник инженера проектировщика промсооружений, т. II и IV. Госстройиздат, 1934.